

電子ビーム近接露光装置及び方法

ELECTRON BEAM PROXIMITY EXPOSURE APPRATUS
AND METHOD発明の背景5 発明の属する技術分野

本発明は、半導体集積回路などの製作工程で使用される微細パターンを露光する露光装置及び方法に関し、特に露光パターンに対応する開口を有するマスクを半導体ウエハなどの試料の表面に近接して配置し、マスクに電子ビームを照射して開口を通過した電子ビームで露光を行う電子ビーム近接露光装置及び方法に関する。

10 関連技術の説明

半導体集積回路の高集積化が図られており、回路パターンの一層の微細化が望まれている。現在、微細化の限界を規定しているのは主として露光装置であり、光学式露光装置であるステッパでは、光源の短波長化、N A（開口数）の増加、位相シフト法の採用など各種の方策が取られている。しかし、これ以上の微細化は、製造コストの飛躍的な増大などの各種の問題がある。そこで、電子ビーム直接描画装置やX線露光装置などの新しい方式の露光装置が開発されているが、安定性、生産性及びコストなどの面で多くの問題がある。

電子ビーム近接露光方式は、その露光原理の単純さから“High Throughput Submicron Lithography with Electron Beam Proximity Printing”(H. Bohlen et al., Solid State Technology, September 1984, pp. 210-217)（以下、文献1と称する）に示される如く、古くから研究開発が行なわれたが、電子ビーム特有のプロクシミティ効果の除去が困難で実用性がないと考えられていた。

米国特許第 5,831,272 号（日本特許第 2951947 号に対応）及び“Low energy electron-beam proximity projection lithography: Discovery of missing link” (Takao Utsumi, J. Vac. Sci. Technol. B 17(6), Nov/Dec 1999, pp. 2897-2902)は、この困難を解決して、量産

レベルで超微細加工用に使用可能な電子ビーム近接露光装置を開示している。

図1は、米国特許第 5,831,272 号に開示された電子ビーム近接露光装置の基本構成を示す図である。この図を参照して、米国特許第 5,831,272 号に開示された電子ビーム近接露光装置について簡単に説明する。図1に示すように、コラム10内には、電子ビーム15を発生する電子ビーム源14と整形アパーチャ16と電子ビーム15を平行ビームにする照射レンズ18とを有する電子銃12、対となる主偏向器22、24を含み、電子ビームを光軸に平行に走査する走査手段20、露光するパターンに対応する開口を有するマスク30、及び表面にレジスト層42が形成された試料（半導体ウエハ）40が設けられている。マスク30は、厚い外縁部分34内の中央に開口の形成された薄い膜32を有しており、試料40は表面がマスク30に近接するように配置される。この状態で、マスクに垂直に電子ビームを照射すると、マスクの開口を通過した電子ビームが試料40の表面のレジスト層42に照射される。走査手段20により電子ビーム15を偏向して（図1のA、B、Cは3箇所に偏向されたビームを示す）、マスク30上の薄い膜32の全面を走査すると、マスク30のすべての開口パターンが露光されることになる。走査手段20には、電子ビームを僅かに傾斜するための副偏向器51、52が設けられており、マスク30と試料40の位置合わせと、マスクの歪と試料の歪による露光位置のずれを補正するのに使用される。

図2は、図1の基本構成に基づいて実際に電子ビーム近接露光装置を実現した場合の全体構成を示す図である。図1と同一の機能部分には同一の参照番号を付して表す。

図示のように、電子光学鏡筒10には、電子ビーム15を発生する電子銃14、電子ビーム15を平行ビームにする照射レンズ18、電子ビーム15の照射をオン・オフ制御するためのブランカ電極66、ブランキングアパーチャ68、主偏向器20、及び副偏向器50が設けられている。真空試料室8には、マスク30を保持して移動するマスクステージ36、反射電子を検出する反射電子検出器39、ウエハ40を保持して移動するウエハステージ44、ウエハステージ44上に設けられた標準マーク60、及びウエハ40の表面の高さを検出する高さ検出器46が設けられている。なお、マスクステージ36の移動量を検出するマスクステージ用レーザ測長器38と、ウエハステージ44の移動量を検出するウエハステージ用レーザ測長器48が設けられており、各ステージの移動量を非常に高精度で検出できるようになっている。また、

ウエハステージ44は、少なくとも2軸方向に移動可能である。ここでは、反射電子検出器39を使用するが、これの代わりに二次電子を検出する二次電子検出器を設けることも可能である。一般に、反射電子検出器を使用してマーク位置を検出する方法は、重金属などで形成したマークを検出するのに適しており、二次電子検出器を使用してマーク位置を検出する方法は、マークと周辺の材料の密度の差が小さい場合に適している。

装置の制御は計算機(コンピュータ)70で行われる。マスクステージ用レーザ測長器38とウエハステージ用レーザ測長器48の検出信号は、コンピュータ70のデータベースに供給される。反射電子検出器39と標準マークに設けられた検出器と高さ検出器46の検出信号は、信号処理回路76に供給されて、デジタル信号に変換された後、コンピュータ70のデータベースに供給される。照射レンズ18は電磁レンズ又は静電レンズであり、コンピュータ70から照射レンズ電源71を介して制御される。同様に、ブランカ電極66はブランカ・ドライバ72を介して制御される。コンピュータ70はデジタル演算回路75に偏向量データを供給し、デジタル演算回路75はあらかじめ記憶された補正データに従って偏向量データを補正する演算を行い、主DAC/AMP73と副DAC/AMP74に供給する。主DAC/AMP73と副DAC/AMP74は、それぞれ補正された偏向量データをアナログ信号に変換した後増幅して主偏向器20と副偏向器50に供給する。これにより、所望の偏向が行われる。

電子銃14は、電子ビームを安定して出力するために常時オン状態にあり、電子ビームを常時出力する。そのため、必要に応じて電子ビームをマスク30及びそれを通してウエハ40に照射するかしないかを制御するブランカを設ける必要がある。ブランカは、ブランカ電極66、ブランキングアパーチャ68及びブランカドライバ72で構成され、電子ビームの照射をオン・オフ制御する。ブランカドライバ72からブランカ電極66に電圧を印加しない時には、電子ビーム15はそのまま直進してブランキングアパーチャ68を通過し、マスク30に照射される。ブランカドライバ72からブランカ電極66に電圧を印加すると、ブランカ電極66により電界が形成されて電子ビーム15が偏向し、ブランキングアパーチャ68で遮断されるので、マスク30に照射されない。電子ビームの照射のブランカによるオン・オフ制御は高速である

ことが要求される。

上記の文献1は、図3に示すように、電子ビーム15を六角形の形状とし、隣接する走査による露光が重なるようにしながらマスクの走査範囲33を走査する方式を開示している。ビームが大きいほど1回の走査で露光できる範囲が大きくなるので、露光装置のスループットの点からは、ビームは大きい方がよい。また、図3の走査方法は、六角形の電子ビーム15内の強度分布が一様である場合には、走査位置のずれの影響を低減して全面に渡って一様な露光量分布を得ることができる。露光量分布のむらは現像後のレジストのパターン幅の誤差を引き起こすので、できるだけ一様であること、例えば露光むらが数%～十数%以内であることが要求される。しかし、図3に示すような六角形の電子ビーム15内の全面に渡って強度分布のむらをこのような範囲に収めるのは非常に難しく、許容できない露光量分布のむらが発生しやすい。

そこで、本出願人は、日本特許出願 2000-222201 号で、隣接する走査線の間隔を電子ビームの走査に垂直な方向の幅より十分に狭くして、走査位置を徐々にずらしながら、露光パターンの各部分が複数回の走査により露光されるようにする方法を提案している。これによれば、たとえ電子ビームの強度分布にむらがあっても、強度分布が平均化されるので、露光むらが低減される。この場合も、露光装置のスループットの点からは、ビームは大きい方がよい。

しかし、電子ビームが大きいとビームの走査幅を大きくする必要がある。図3に示すように、走査範囲33の幅をL、ビームの幅をDとすると、走査範囲で一様な露光を行なうには、走査幅をL+D以上にする必要がある。従ってビームを大きくするとその分走査幅を大きくする必要があり、偏向器のコスト増加や走査時間が長くなるという問題を生じる。

更に、電子ビームが大きいと電子ビームの照射のブランカによるオン・オフ制御の速度が低下するという問題を生じる。図4は、この問題を説明する図である。図示のように、電子銃14から出力された電子ビーム15は、照射レンズ18により平行ビームにされ、ブランカ電極66の間を通過する。ブランキングアパーチャ68は、照射レンズ18を通過した平行な電子ビームより少し大きな開口を有する。ブランカ電極66に電圧が印加されていない時には、破線で示すように、平行な電子ビームはそのまま直進し、ブランキングアパーチャ68の開口を通過する。これに対して、ブラ

ンカ電極 6 6 に電圧が印加されている時には、実線で示すように、平行な電子ビームはブランカ電極 6 6 の部分に発生する電界により偏向され、ブランキングアパーチャ 6 8 の開口以外の部分に照射されるので、遮断される。ブランカは、このようにして電子ビームの照射をオン・オフ制御する。

5 ここで、平行な電子ビームの幅を W 、ブランキングアパーチャ 6 8 の開口の幅を D とすると、 $D > W$ である。平行な電子ビームを完全に遮断するには、平行な電子ビームをブランキングアパーチャ 6 8 上で D だけ偏向する必要がある。従って、平行な電子ビームを遮断するには、平行な電子ビームの幅 W が大きいほど電子ビームを大きく偏向する必要がある。電子ビームを大きく偏向するにはブランカ電極 6 6 に大きな電圧を印加する必要があるが、ブランカドライバ 7 2 を構成する回路のスルーレートは一定であり、ブランカドライバ 7 2 から出力される電圧は、電圧が大きいほど応答時間が長くなる。すなわち、平行な電子ビームの幅 W が大きいほど電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答時間が長くなる。電子ビームの照射がオンとオフの間で切り換わる間は、電子ビームの一部がマスクに照射されるので、電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答時間が長くなると制御されない露光が行われることになり、露光パターンの品質を劣化させるという問題を生じる。このように、電子ビームの照射のブランカによるオン・オフ制御の点からは、電子ビームの大きさはできるだけ小さい方がよい。

15 以上説明したように、電子ビームの大きさは、露光装置のスループットと電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答性の点でトレード・オフの関係にあり、装置の使用に
20 応じて両方の点を考慮して適当な電子ビームの大きさを決定することになる。

発明の概要

本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、露光装置のスループットを低下させることなく、電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答性を改善することを目
25 的とする。

この目的を達成するために、本発明の電子ビーム近接露光装置は、電子ビームを発生する電子ビーム源と、前記電子ビームを整形する電子ビーム整形手段と、整形され

た前記電子ビームの経路中に配置され、開口を有するマスクと、整形された前記電子ビームが前記マスク上を走査するように、前記電子ビームを偏向する走査偏向手段と、試料を保持して移動するステージと、を備え、前記マスクは前記試料の表面に近接して配置され、前記マスクの開口を通過した電子ビームによって前記試料の表面に前記開口に対応するパターンが露光され、前記電子ビーム整形手段は、前記電子ビームを、その断面が前記走査の方向の幅が狭く前記走査の方向に垂直な方向の幅が広い細長いビームに整形することを特徴とする。

本発明によれば、マスク上を走査する平行な電子ビームの断面は、走査方向に垂直な方向の幅が広いので露光装置のスループットは高い。一方、電子ビームの走査方向の幅は狭いので、走査幅は狭くできる。更に、ブランカによる偏向方向を走査方向にすれば、電子ビームの幅が狭く、電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答性を高くできる。

好ましくは、電子ビームを断面が細長い電子ビームに整形するために、一方向にのみパワーを有する静電シリンドリカルレンズを利用する。

好ましくは、露光むらを低減するために、隣接する走査線の間隔を電子ビームの走査に垂直な方向の幅より十分に狭くして、走査位置を徐々にずらしながら、露光パターンの各部分を複数回の走査により露光する。この場合、試料のパターンの各部分は、電子ビームの5回以上の走査で露光されるようにすることが好ましい。

図面の簡単な説明

The nature of this invention, as well as other objects and advantages thereof, will be explained in the following with reference to the accompanying drawings, in which like reference characters designate the same or similar parts throughout the figures and wherein:

図1は、公知文献に記載された電子ビーム近接露光装置の基本構成を示す図であり；

図2は、公知文献に記載された電子ビーム近接露光装置を実際に実現した場合の全体構成を示す図であり；

図3は、公知文献に記載された電子ビームの走査例を示す図であり；

図4は、電子ビーム近接露光装置におけるブランカの動作を説明する図であり；

図5（A）及び5（B）は、本発明の原理を説明する図であり；

図6（A）及び6（B）は、本発明の第1の実施の形態の電子ビーム近接露光装置における照射レンズ付近の構成を示す図であり；

5 図7（A）、7（B）及び7（C）は、第1の実施の形態の電子ビーム近接露光装置で使用する静電レンズ及び静電シリンドリカルレンズの構成例を示す図であり；

図8は、第1の実施の形態の電子ビーム近接露光装置で使用する静電シリンドリカルレンズの別の構成例を示す図であり；

10 図9は、第1の実施の形態の電子ビーム近接露光装置におけるマスク上の電子ビームの走査を示す図である。

好ましい実施の形態の詳細な説明

図5（A）及び5（B）は、本発明の原理を示す図である。

15 図5（A）に示すように、本発明の電子ビーム近接露光装置では、マスク上を走査する平行な電子ビーム15の断面を、走査方向の幅が狭く、走査方向に垂直な方向の幅が広い細長いビームにする。これにより、マスク上を走査する平行な電子ビーム15の断面は、走査方向に垂直な方向の幅が広いので、露光装置のスループットは高い。一方、走査方向の幅は狭いので、走査幅は狭くできる。更に、図5（B）に示すように、ブランカによる偏向方向を走査方向にすれば、電子ビームの幅が狭く、電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答性を高くできる。

20 以下、本発明の実施の形態を説明するが、本発明の実施の形態は、図1及び図2で説明した電子ビーム近接露光装置において、照射レンズとブランカ電極の部分のみが従来例と異なるので、この部分についてのみ説明する。

25 図6（A）及び6（B）は、実施の形態の電子ビーム近接露光装置の電子銃14、照射レンズ18及びブランカ電極66の部分の構成を示す図であり、図6（A）は光軸（Z軸）とX軸を含む断面を、図6（B）はZ軸とY軸を含む断面を示す。なお、ブランカ電極66は平行に設けられた2つの電極で、電圧が印加されると、Y軸方向に電極を形成するが、X軸方向には電界を形成しないものとする。

図示のように、本実施の形態では、静電シリンドリカルレンズ 8 1 と 8 2 が更に設けられている。静電シリンドリカルレンズ 8 1 と 8 2 は、一方向には収束作用を有するが、それに垂直な方向には収束作用を有しない静電レンズである。ここでは、静電シリンドリカルレンズ 8 1 と 8 2 は、図 6 (A) に示すように、X 軸方向には収束作用を有せず、図 6 (B) に示すように、Y 軸方向には収束作用を有する。

X-Z 平面では、図 6 (A) に示すように、電子銃 1 4 から出力された電子ビームは、静電シリンドリカルレンズ 8 1 の影響を受けずにそのまま通過し、焦点が電子銃 1 4 にある照射レンズ 1 8 で幅の広い平行ビームにされる。この電子ビームの幅 (X 軸方向の幅) が、細長いビームの長軸方向の幅に相当する。電子ビームは、更にブランカ電極 6 6 及び静電シリンドリカルレンズ 8 2 の影響を受けずにそのまま通過し、ブランキングアパーチャ 6 8 の開口を通過する。

Y-Z 平面では、図 6 (B) に示すように、電子銃 1 4 から出力された電子ビームは、静電シリンドリカルレンズ 8 1 により収束され、更に照射レンズ 1 8 で収束されるため、平行なビームにはならず、収束するビームになる。この収束ビームは、ブランカ電極 6 6 を通過し、一旦 2 次焦点 R に収束された後再び広がる。この電子ビームは広がりながら、2 次焦点 R を焦点とする静電シリンドリカルレンズ 8 2 に入射し、幅の狭い平行ビームにされる。この電子ビームの幅 (Y 軸方向の幅) が、細長いビームの短軸方向の幅に相当する。従って、静電シリンドリカルレンズ 8 2 を通過した後は、X 方向と Y 方向の両方向で平行ビームになる。

電子ビームは、X-Z 平面ではブランカの影響を受けないが、Y-Z 平面では、ブランカ電極 6 6 に電圧が印加されていない時には、偏向されずにそのままブランキングアパーチャ 6 8 の開口を通過するが、ブランカ電極 6 6 に電圧が印加されている時には、ブランカ電極 6 6 間に形成される電界により参照番号 8 3 で示す経路方向に偏向され、ブランキングアパーチャ 6 8 で遮断される。このようにして、ブランカにより電子ビームの照射のオン・オフが制御される。ブランキングアパーチャ 6 8 の開口は、Y 方向は狭いので、電子ビームの照射をオン・オフする時の電子ビームの偏向量は小さくてよく、電子ビームの照射を高速にオン・オフ制御することが可能である。

次に、照射レンズ 1 8 及び静電シリンドリカルレンズ 8 1 と 8 2 の構成を説明する。本実施の形態では、これらのレンズを静電レンズで実現する。

図7 (A) は、照射レンズ18を実現する電極の例であり、この構成は従来からよく知られている。図示のように、中心部に円形の開口を有する3枚の円形電極83、84及び85を、中心を光軸に一致させて間隔をあけて配置する。そして、図7 (B) に示すように、両側の円形電極83と85を接地し、中間の円形電極84に正の電圧を印加する。これにより、光軸に対称な正のパワーを有する静電レンズが形成される。

図7 (C) は、静電シリンドリカルレンズ81と82を実現する電極の例である。図示のように、3枚の平板状の電極91A、91B及び93Aと3枚の平板状の電極91B、91B及び93Bをそれぞれ間隔をあけて平行に配置し、電極91Aと91B、92Aと92B、93Aと93Bの端面が対向するように配置する。言い換えれば、3枚の平板状の電極を間隔をあけて平行に配置し、中央部を一定の間隔で切り取った構成である。電極91Aと91B及び93Aと93Bは接地し、電極92Aと92Bに正の電圧を印加すると、図のYで示す方向にのみ正のパワーを有する静電シリンドリカルレンズが形成される。

なお、静電シリンドリカルレンズは、図8に示すように対向する電極95と97に正の電圧を、対向する電極96と98に負の電圧を印加する4極子レンズでも実現できる。

以上のようにして形成された細長い電子ビームで、マスク上を走査する。この際、図9に示すように、細長い電子ビームの走査に垂直な方向の幅をL、隣接する走査線の間隔をPとした場合、LをPの数倍、好ましくは5倍以上として、マスク上の各点が複数回の走査により露光されるようにする。これにより、細長い電子ビームの走査に垂直な方向の強度むらの影響が低減される。

以上説明したように、本発明によれば、マスクを走査する電子ビーム近接露光装置において、大きな走査幅のままで露光装置のスループットを低下させることなく、電子ビームの照射のオン・オフ制御の応答性を改善することが可能になる。

It should be understood, however, that there is no intention to limit the invention to the specific forms disclosed, but on the contrary, the invention is to cover all modifications, alternate constructions and equivalents falling within the spirit and scope of the invention as expressed in the appended claims.